

УДК 621.372

Розподіл енергії в електромагнітному полі. Порції потоку енергії. Порції енергії

Найденко В. І.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського“

E-mail: victor_naydenko@ukr.net

Проаналізовано розподіл енергії в електромагнітному полі гармонічної хвилі. Введено поняття порції потоку енергії, порції енергії. Доведено, що енергія електромагнітної хвилі поширюється порціями (квантами, в не сучасному розумінні цього слова). Показано, що фазова швидкість є фізично зрозумілою величиною – це є швидкість поширення порцій потоку енергії, порцій енергії. Процес переносу енергії є хвильовим процесом, що рухається зі швидкістю, рівною фазовій швидкості компонент поля, вектора Пойнтинга, густини енергії і енергії.

Ключові слова: гармонічна хвиля; фазова швидкість; хвильовий процес; вектор Пойнтинга; густина енергії; енергія в об'ємі

Вступ

Матеріал статті є важливим для розуміння процесу передачі енергії електромагнітною хвилею, його швидкості, розподілу енергії в просторі, про незнання якого в главі 27, § 4 [1] писав лауреат Нобелівської премії Р. Фейнман: «... надо сознаться, что мы так и не знаем, как же на самом деле распределена энергия в электромагнитном поле». І хоча ці слова були написані ще в 1963 році, ситуація за 54 роки не змінилася [2, 3]. Досі увага зосереджена на середніх значеннях електромагнітних величин, важливих для практичних застосувань. Фізичне розуміння відкладено до шухляди. Проте, відсутність розуміння розподілу енергії в електромагнітному полі приводить до неочікуваних висновків, аж до твердження про невідповідність теорії Фарадея-Максвелла реальним фізичним процесам [4], про те, що фазова швидкість «не відповідає швидкості реального фізичного поширення будь-якої величини» [5, 6], що фазова швидкість «являє собою, по суті, чисто геометричне поняття, залежне від того, в якому напрямку вона відраховується» [7].

У статті вводяться нові важливі поняття: фазової швидкості густини потоку енергії, фазової швидкості потоку енергії, поняття порції густини потоку енергії, порції густини енергії. Введені величини проливають світло на розподіл енергії в електромагнітному полі гармонічної хвилі, на природу електромагнітної хвилі.

1 Вектор Пойнтинга. Порції густини потоку енергії

Виберемо відповідну орієнтацію прямокутної системи координат і виразимо вектор Пойнтинга плоскої однорідної хвилі через поля в дійсній формі:

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = E_x \mathbf{e}_x \times H_y \mathbf{e}_y = (E_x H_y) \cdot \mathbf{e}_z = P_z \mathbf{e}_z$$

Отже, вектор Пойнтинга направлений уздовж осі z , якщо $P_z > 0$ і в протилежному напрямі, якщо $P_z < 0$. При $P_z > 0$ напрям $\mathbf{P}$ узгоджується з напрямком фазової швидкості.

Запишемо вирази для E_x і H_y , вважаючи амплітуду A плоскої однорідної хвилі, що поширюється в середовищі без втрат, дійсною величиною:

$$E_x = A \cos(\omega t - kz) \quad (1)$$

$$H_y = \frac{A}{\rho} \cos(\omega t - kz) \quad (2)$$

Фазові швидкості електричного і магнітного поля, на які вказував ще Стреттон [8],

$$v_\Phi = \omega/k = c/\sqrt{\epsilon'\mu'}$$

Вектор Пойнтинга

$$\mathbf{P} = \frac{A^2}{\rho} \cos^2(\omega t - kz) \mathbf{e}_z \quad (3)$$

Потік енергії пропорційний квадрату косинуса. Густина потоку енергії або позитивна, або нульова (коли аргумент косинуса кратний непарному числу $\pi/2$, тобто коли $\omega t - kz = \pm(2n-1)\pi/2$, $n=0, 1, \dots$

Площини нульових значень вектора Пойнтинга є площинами нульових значень компонент E_x і H_y . В проміжках між цими площинами вектор Пойнтинга позитивний. В кожній площині $z=const$ за половину періоду поля спостерігається повний цикл зміни вектора Пойнтинга, наприклад, від нульового через максимальний і до нульового.

Площини з нульовою густиною потоку енергії рознесені одна від одної на відстань $\lambda/2$. Площини з максимальною густиною потоку енергії рознесені одна від одної також на відстань $\lambda/2$. Кожний шар простору товщиною $\lambda/2$ не обмінюється потоком енергії з рештою простору, тобто веде себе енергетично ізольовано.

Отже можна говорити, що потік енергії електромагнітного поля поширюється порціями (квантами в не сучасному розумінні цього слова). Час знаходження порції в даній точці дорівнює $T/2$, а протяжність порції у просторі – $\lambda/2$ ($kl=\pi$). При поширенні хвилі (у вакуумі, в однорідному ізотропному середовищі без втрат) ця порція не змінює своєї протяжності і форми. Вона рухається як ціле без деформації. Значить, існують сили, які утримують порцію як ціле і з таким розподілом потоку енергії. Природа сил, які утримують порцію як ціле без деформацій, має бути вивчена окремо.

Розподіл густини потоку енергії як функції часу для трьох значень $kz=0, \pi/8, \pi/4$ наведено на рис. 1 (суцільною товстою, тонкою і штриховою лініями відповідно). Хоча його вигляд описується відомою функцією – квадратом косинуса, ми даємо його для фізичного пояснення процесу передачі енергії як хвильового процесу, для усвідомлення поняття порції енергії і порівняння хвильового процесу в середовищі без втрат з відповідним графіком для хвилі, що поширюється в середовищі з втратами [9], і хвилі, випроміненої диполем Герца [10].

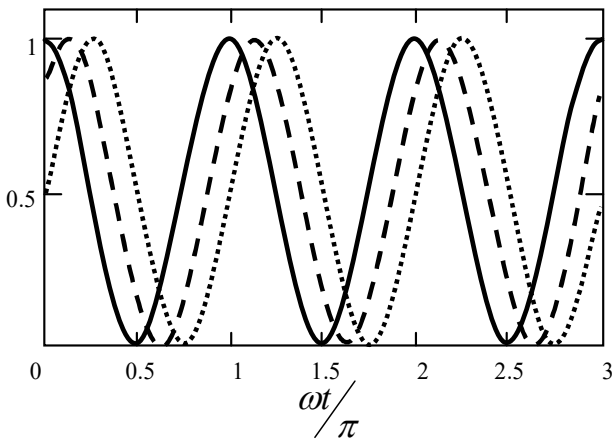


Рис. 1

Якщо погодитися з існуванням порцій густини потоку енергії, то тоді стає зрозумілим як в площині з нульовим значенням вектора Пойнтинга біжучої хвилі в даний момент в наступний момент з'являється електромагнітне поле. Пояснення цьо-

го факту викликало труднощі у багатьох авторів. Потік вектора Пойнтинга не виникає з нуля, як це вважають деякі автори. Відходить (зміщується в напрямі поширення) одна порція, на її місце приходить інша.

Потік енергії неперервний. Неперервність потоку енергії слід трактувати як неперервність потоку порцій потоку енергії, або як неперервний потік середнього значення (за період або за половину періоду). Одна порція енергії іде, наступна приходить. Це триває доти, доки остання порція енергії, випромінена джерелом, не досягне даної точки спостереження. Не можна говорити, що існують точки, в яких потік енергії дорівнює нулю і далі ні з чого виникає потік енергії, просто на місце минулої порції приходить нова.

Проілюструємо ці міркування математично. Запишемо вектор Пойнтинга в іншій формі, скориставшись відомою формулою тригонометрії:

$$\mathbf{\Pi} = \frac{A^2}{2\rho} (1 + \cos(2\omega t - 2kz)) \mathbf{e}_z \quad (4)$$

Маємо постійну у часі складову і змінну з часом:

$$\mathbf{\Pi} = \bar{\mathbf{\Pi}} + \tilde{\mathbf{\Pi}} = (\bar{\mathbf{\Pi}} + \tilde{\mathbf{\Pi}}) \mathbf{e}_z$$

причому

$$\bar{\mathbf{\Pi}} = \frac{A^2}{2\rho} \mathbf{e}_z$$

$$\tilde{\mathbf{\Pi}} = \frac{A^2}{2\rho} \cos(2\omega t - 2kz) \mathbf{e}_z \quad (5)$$

Видно, що постійна складова визначає середнє значення вектора Пойнтинга. Змінна з часом складова вектора Пойнтинга є **хвилею** (порівняти (5) з (1), (2)), що рухається з фазовою швидкістю

$$v_{\text{ф}} = \frac{2\omega}{2k} = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'\mu'}}$$

рівній фазовій швидкості компонент електромагнітного поля. Змінна з часом складова відбиває той факт, що густина потоку енергії в просторі розподілена нерівномірно.

Наведений погляд суперечить традиційному, в якому стверджується, що доданок, який дає змінне значення густини потужності (5) символізує «колеблющуюся» частину вектора Пойнтинга [11, с. 18 – 22, п. 5, с. 26 – 32, п. 7]. Немає «колеблющейся» частини. «Колеблющаяся» частина характеризує коливальний процес, тут процес хвильовий.

Цікаво, що вираз для вектора Пойнтинга (4) в підручниках, посібниках, настановках, як правило, не наводиться. Виключенням тут є [12], в якому наводиться вираз, подібний до (4). Формула супроводжується таким коментарем: «... вектор Пойнтинга имеет постоянную составляющую... и переменную, изменяющуюся с двойной угловой частотой». Автор не побачив тут хвилі, хвильового процесу і пройшов

мимо можливого фізичного пояснення процесу передачі енергії. Спроба записати вектор Пойнтинга для суми двох хвиль у середовищі без втрат здійснена в [13] на с. 250. Але автор зробив помилку під час тригонометричного перетворення і формула виявилася неправильною. Автор дає тлумачення одержаного виразу: «В каждой точке пространства поток колеблется с частотой 2ω , принимая только положительные или нулевые значения, около среднего значения...».

Спостерігач, що рухається з фазовою швидкістю вектора Пойнтинга, помічає незмінне значення густини потужності. Це значення визначається координатами t_0 , z_0 площини спостереження. Якщо, наприклад, спостерігач знаходиться в максимумі поля (електричного або магнітного, наприклад, при $\omega t_0 - kz_0 = 0$), то він спостерігає значення вектора Пойнтинга

$$\bar{\mathbf{P}} = \frac{A^2}{\rho} \mathbf{e}_z$$

Постійна і змінна в часі складові є результатом математичної обробки нерівномірного розподілу густини потоку енергії – виділення постійної за час, кратний половині періоду хвилі, складової і змінної, яка показує, що процес передачі енергії є хвильовим процесом з тією ж самою фазовою швидкістю, що і фазова швидкість компонент електромагнітного поля. Все це говорить про те, що фазова швидкість є повноцінною характеристикою хвильового процесу. Додамо до цього факт, що електричне поле діє на заряджені частинки з силою $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$. Якщо $\mathbf{E}$ є хвилею, то і $\mathbf{F}$ є хвилею. Більше того, відомо, що принцип дії багатьох електронних приладів (ламп біжучої і зворотної хвилі, магнетронів, гіротронів, оротронів тощо) а також прискорювачів заряджених частинок (зокрема, лінійних) базується на синхронізмі електронів з фазовою швидкістю електричного поля електромагнітної хвилі [14, 15]. Отже, фазова швидкість має реальне використання. Подібні міркування можна навести і стосовно магнітного поля. Відомі системи відхилення променя електронів, в яких основним фактором є біжуче з відповідною фазовою швидкістю магнітне поле [15]. Отже, і фазова швидкість магнітного поля також має реальне використання.

Очевидно, що і потік вектора Пойнтинга, що рухається з тією ж самою фазовою швидкістю, також потрібно розглядати як реальний і зрозумілий фізичний процес. Як ж тоді є підстави вважати фазову швидкість величиною, яка «не відповідає швидкості реального фізичного поширення будь-якої величини» [5, 6], або яка «не дає ніякого уявлення про дійсну швидкість поширення хвильового збурення в даному середовищі» [16], або яка «являє собою, по суті, чисто геометричне поняття, яке залежить від того, в якому напрямі вона відраховується» [7]? Їх немає.

Погляд на фазову швидкість як на другорядну величину є безпідставним, не обґрунтованим ніякими фізичними міркуваннями. Тому очевидно, що ставлення до фазової швидкості електромагнітної хвилі має бути докорінно змінено.

Отже, фазова швидкість є фізично зрозумілою величиною – це є швидкість поширення порцій густини потоку енергії. В плоскій електромагнітній хвилі, що поширюється в діелектрику (в середовищі без втрат) всі фазові швидкості (електричного поля, магнітного поля, вектора Пойнтинга) однакові і визначаються за законом Максвелла $v_\Phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'\mu'}}$.

В природі існує сума $\bar{\mathbf{P}} + \tilde{\mathbf{P}}$ і потрібно розглянути її фізичну сутність. Змінна в часі складова вектора Пойнтинга не може трактуватися окремо від постійної, це є математичний результат – наслідок відокремлення постійної (середньої) частини вектора Пойнтинга від повного значення.

У відомих підручниках, посібниках, настановах тощо аналіз поширення електромагнітних хвиль закінчується одержанням середніх значень вектора Пойнтинга, густини енергії. Мотивація при цьому полягає в тому, що середні значення – це те, що реєструють наші прилади. Це так, але при цьому втрачається фізична суть процесу передачі енергії, можливість потрактування розподілу енергії в просторі, розуміння фазової швидкості.

Все, що стосується вектора Пойнтинга, може бути перенесено на густину енергії електричного поля, густину енергії магнітного поля, густину енергії електромагнітного поля.

2 Густина енергії електричного поля. Густина енергії магнітного поля. Густина енергії електромагнітного поля. Порції густини енергії електромагнітного поля

Густина енергії електричного поля, записана через поля в дійсній формі

$$w_E = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \epsilon' E_x E_x = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \epsilon' A^2 \cos^2(\omega t - kz)$$

Графік цієї функції збігається з графіком функції Π на рис. 1. Іншим є лише масштаб по осі ординат.

Скориставшись відомою формулою тригонометрії представимо

$$w_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon' E_x E_x = \frac{1}{4} \epsilon_0 \epsilon' A^2 (1 + \cos(2\omega t - 2kz))$$

Постійна в часі складова густини енергії електричного поля

$$\bar{w}_E = \frac{1}{4} \cdot \epsilon_0 \epsilon' A^2$$

змінна в часі складова густини енергії електричного поля

$$\tilde{w}_E = \frac{1}{4} \cdot \varepsilon_0 \varepsilon' A^2 \cos(2\omega t - 2kz)$$

Бачимо, що змінна з часом складова густини енергії електричного поля є **хвилею**, яка рухається з фазовою швидкістю

$$v_\Phi = \frac{2\omega}{2k} = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}}$$

рівній фазовій швидкості компонент електромагнітного поля і фазовій швидкості вектора Пойнтинга. Спостерігач, що рухається з фазовою швидкістю густини енергії електричного поля спостерігатиме незмінне значення густини енергії електричного поля. Як і для вектора Пойнтинга для густини енергії електричного поля можна ввести поняття **порції**, наприклад, між сусідніми площинами з нульовою густиною енергії електричного поля.

Густина енергії магнітного поля, записана через поля в дійсній формі

$$w_m = \frac{1}{2} \mu_0 \mu' H_y H_y = \frac{1}{2} \mu_0 \mu' \frac{A^2}{\rho^2} \cos^2(\omega t - kz)$$

Це та ж сама функція, що і на рис. 1, тільки в іншому масштабі.

Останній вираз можна записати аналогічно попередньому. Постійна в часі складова густини енергії магнітного поля

$$\bar{w}_m = \frac{1}{4} \cdot \mu_0 \mu' \frac{A^2}{\rho^2}$$

змінна в часі складова густини енергії магнітного поля

$$\tilde{w}_m = \frac{1}{4} \cdot \mu_0 \mu' \frac{A^2}{\rho^2} \cos(2\omega t - 2kz)$$

Змінна з часом складова густини енергії магнітного поля є **хвилею**, що рухається з фазовою швидкістю

$$v_\Phi = \frac{2\omega}{2k} = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}}$$

рівній фазовій швидкості компонент електромагнітного поля, фазовій швидкості вектора Пойнтинга, фазовій швидкості енергії електричного поля. Отже, спостерігач, що рухається з фазовою швидкістю густини енергії магнітного поля спостерігатиме незмінне значення густини енергії магнітного поля. Для густини енергії магнітного поля, як і для густини енергії електричного поля і вектора Пойнтинга, можна ввести поняття порції.

Підстановка значення ρ доводить, що в ідеальному діелектрику (і в вакуумі) густини енергії електричного і магнітного полів є однаковими:

$$w_E = w_m$$

Густина енергії електромагнітного поля

$$w = w_E + w_m = \frac{1}{2} A^2 (\varepsilon_0 \varepsilon' + \frac{\mu_0 \mu'}{\rho^2}) \cdot \cos^2(\omega t - kz) = \varepsilon_0 \varepsilon' A^2 \cos^2(\omega t - kz) \quad (6)$$

може бути записана через постійну в часі і змінну з часом складові густини енергії електромагнітного поля

$$\bar{w} = \bar{w}_E + \bar{w}_m = \frac{1}{4} \cdot A^2 (\varepsilon_0 \varepsilon' + \frac{\mu_0 \mu'}{\rho^2}) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon' A^2$$

$$\tilde{w} = \tilde{w}_E + \tilde{w}_m = \frac{1}{4} \cdot A^2 (\varepsilon_0 \varepsilon' + \frac{\mu_0 \mu'}{\rho^2}) \cdot \cos(2\omega t - 2kz) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon' A^2 \cos(2\omega t - 2kz)$$

Отже, змінна з часом складова густини енергії електромагнітного поля є хвилею, що рухається з фазовою швидкістю

$$v_\Phi = \frac{2\omega}{2k} = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}}$$

Тут ураховано визначення хвильового опору діелектрика $\rho = \sqrt{\mu_0 \mu' / (\varepsilon_0 \varepsilon')}$.

В кожній точці простору за половину періоду поля спостерігається повний цикл зміни значень густини енергії електромагнітного поля (6), наприклад, від нульового через максимальне до нульового.

В будь-який момент часу у просторі є площини з максимальною густиною енергії електромагнітного поля і з нульовою густиною енергії. Ці площини рознесені одна від одної на відстань у $\lambda/4$. Між двома сусідніми площинами з нульовими густинами енергії розміщена порція густини енергії електромагнітного поля. Порція енергії рухається як ціле без деформації з фазовою швидкістю, рівній фазовій швидкості компонент електромагнітного поля, вектора Пойнтинга, густини енергії електричного поля, густини енергії магнітного поля. Порції енергетично ізольовані одна від одної.

В природі існує сума енергій $w = \bar{w} + \tilde{w}$ і потрібно розглядати її фізичну сутність. Кожну зі складових – постійну і змінну – потрібно розглядати як результат математичного представлення. Постійна в часі складова – середнє значення густини енергії за проміжок часу, кратний половині періоду. Змінна в часі складова густини енергії електромагнітного поля обумовлена неоднорідним розподілом густини енергії в часі і в просторі.

3 Швидкість поширення енергії електромагнітні хвилі в середовищі без втрат Перелік посилань

Швидкість поширення енергії хвилі, що поширюється в середовищі без втрат, можна знайти через повні значення вектора Пойнтинга і густини енергії електромагнітного поля

$$\mathbf{v}_e = \frac{\mathbf{P}}{w} = \frac{\frac{A^2}{\rho} \cos^2(\omega t - kz)}{\frac{1}{2} \cdot A^2 (\varepsilon_0 \varepsilon' + \frac{\mu_0 \mu'}{\rho^2}) \cos^2(\omega t - kz)} \mathbf{e}_z =$$

$$= \frac{2}{\rho (\varepsilon_0 \varepsilon' + \frac{\mu_0 \mu'}{\rho^2})} \mathbf{e}_z = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}} \mathbf{e}_z$$

через середні значення цих же величин

$$\mathbf{v}_e = \frac{\bar{\mathbf{P}}}{\bar{w}} = \frac{\frac{A^2}{2\rho}}{\frac{1}{4} \cdot A^2 (\varepsilon_0 \varepsilon' + \frac{\mu_0 \mu'}{\rho^2})} \mathbf{e}_z =$$

$$= \frac{2}{\rho (\varepsilon_0 \varepsilon' + \frac{\mu_0 \mu'}{\rho^2})} \mathbf{e}_z = \frac{1}{\rho \varepsilon_0 \varepsilon'} \mathbf{e}_z = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}} \mathbf{e}_z$$

або навіть через змінні в часі значення цих же величин

$$\mathbf{v}_e = \frac{\tilde{\mathbf{P}}}{\tilde{w}} = \frac{\frac{A^2}{2\rho} \cos(2(\omega t - kz))}{\frac{1}{4} \cdot A^2 (\varepsilon_0 \varepsilon' + \frac{\mu_0 \mu'}{\rho^2}) \cos(2(\omega t - kz))} \mathbf{e}_z =$$

$$= \frac{2}{\rho (\varepsilon_0 \varepsilon' + \frac{\mu_0 \mu'}{\rho^2})} \mathbf{e}_z = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}} \mathbf{e}_z$$

Результат виходить один і той же: швидкість поширення енергії дорівнює фазовій швидкості і визначається законом Максвелла

$$\mathbf{v}_e = \mathbf{v}_f = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}} \mathbf{e}_z$$

Отже в задачі визначення швидкості поширення енергії плоскої електромагнітної хвилі в середовищі без втрат не важливо, які значення вектора Пойнтинга і густини енергії електромагнітного поля використано — повні, середні чи змінні. Швидкість поширення енергії дорівнює фазовій швидкості компонент електромагнітного поля, фазовій швидкості вектора Пойнтинга і фазовій швидкості густини енергії електромагнітного поля. Це є ще одним аргументом на користь того, що фазова швидкість є фізично зрозумілою величиною, вона має чіткий фізичний зміст — це є швидкість поширення порцій енергії.

Отже для визначення швидкості поширення енергії не обов'язково використовувати лише середні значення, як це стверджується, наприклад, в [9, с. 177-179].

Наведені результати, прості з математичного і фізичного погляду, ускладнюються при розгляді більш складних процесів, наприклад хвиль, збуджених диполем Герца [10, 17].

1. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. — Вып. 6. — 343 с.
2. Yaghjian A. D. Classical Power and Energy Relations for Macroscopic Dipolar Continua Derived from the Microscopic Maxwell Equations / A. D. Yaghjian // Progress in Electromagnetic Research B. — 2016. — Vol. 71, 1-37.
3. Gustafsson M. Stored electromagnetic energy expressed in the fields, currents and input impedance / M. Gustafsson // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting ; 19-24 July 2015. — Vancouver, Canada.
4. Харченко К. П. «Электромагнитная волна», лучистая энергия — поток реальных фотонов / К.П. Харченко, В.Н. Сухарев. — М. : КомКнига, 2005. — 128 с.
5. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. 4-е изд. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 656 с.
6. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. — М. : Наука, 1970. — 856 с.
7. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика / Б.З. Каценеленбаум. — М. : Наука, 1966. — 240 с.
8. Stratton J. A. Electromagnetic Theory / J. A. Stratton. — A Wiley-IEEE Press Publication, 2007. — 615 p.
9. Naidenko V. I. Active and Reactive Energy of Electromagnetic Waves / V. I. Naidenko // URSI GASS. — 2017, Montreal, Canada.
10. Naidenko V. I. Evolution of Electromagnetic Waves Radiated by a Hertzian Dipole / V.I. Naidenko // Proc. VIII International Conference on Antenna Theory and Techniques. — 2011. — pp. 63-68.
11. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны, 2-е изд. / Л. А. Вайнштейн. — М. : Радио и связь, 1988. — 440 с.
12. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. — М. : Высшая шк., 1986. — 263 с.
13. Горелик Г. С. Колебания и волны / Г. С. Горелик. — М. : ГИФМЛ, 1959. — 572 с.
14. Вайнштейн Л. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике / Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев. — М. : Сов. Радио, 1973. — 400с.
15. Линейные ускорители ионов. Под ред. Б. П. Мурина. Т. 1, Проблемы и теория. 260 с. Т. 2, Основные системы. — М. : Атомиздат, 1978. — 320 с.
16. Семенов А. А. Теория электромагнитных волн / А. А. Семенов. — М. : Изд-во Моск. Ун-та, 1968. — 319с.
17. Schantz H. G. Electromagnetic Energy Around Hertzian Dipoles / H. G. Schantz // IEEE Antennas and Propagation Magazine. — 2001. — Vol. 43, No 2. — pp. 50-62.

References

- [1] Feinman R., Leiton R. and Sends M. (1963) *Feinmanovskie lektsii po fizike* [Feynman lectures on physics], Vol. 6, 343 p.
- [2] Yaghjian A. D. (2016) Classical Power and Energy Relations for Macroscopic Dipolar Continua Derived from the Microscopic Maxwell Equations, *Progress in Electromagnetic Research B*, Vol. 71, pp. 1-37. DOI: 10.2528/pierb16081901
- [3] Gustafsson M. and Jonsson B. L. G. (2015) Stored electromagnetic energy expressed in the fields, currents and input impedance, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 63, Iss. 1, pp. 24-249. DOI: 10.1109/TAP.2014.2368111
- [4] Kharchenko K. P. and Sukharev V. N. (2005) *"Elektromagnitnaya volna", luchistaya energiya — potok real'nykh fotonov* ["Electromagnetic wave", the radiant energy is the flow of real photons], Moscow, KomKniga, 128 p.
- [5] Landau L. D. and Lifshits E. M. (2005) *Teoreticheskaya fizika. Vol. VIII Elektrodinamika sploshnykh sred* [Theoretical physics. Vol. 8 Electrodynamics of continuous media]. 4-th ed., Moscow, FIZMATLIT, 656 p.
- [6] Born M. and Volf E. (1970) *Osnovy optiki* [Fundamentals of optics], Moscow, Nauka, 856 p.
- [7] Katsenelenbaum B. Z. (1966) *Vysokochastotnaya elektrodinamika* [High frequency electrodynamics], Moscow, Nauka, 240 p.
- [8] Stratton J. A. (2007) *Electromagnetic Theory*, A Wiley-IEEE Press Publication, 615 p. DOI: 10.1002/9781119134640.index
- [9] Naidenko V. I. (2017) *Active and Reactive Energy of Electromagnetic Waves*, URSI GASS, Montreal, Canada.
- [10] Naidenko V. I. (2011) Evolution of Electromagnetic Waves Radiated by a Hertzian Dipole, *VIII International Conference on Antenna Theory and Techniques*, pp. 63-68. DOI: 10.1109/icatt.2011.6170714
- [11] Vainshtein L. A. (1988) *Elektromagnitnye volny, 2-e izd.* [Electromagnetic waves], Moscow, Radio i svyaz', 440 p.
- [12] Bessonov L. A. (1986) *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoe pole* [Theoretical fundamentals of electrical engineering. Electromagnetic field], Moscow, Vysshaya shkola, 263 p.
- [13] Gorelik G. S. (1959) *Kolebaniya i volny* [Oscillations and waves], Moscow, GIFML, 572 p.
- [14] Vainshtein L. A. and Solntsev V. A. (1973) *Lektsii po sverkhvysokochastotnoi elektronike* [Lectures on ultrahigh-frequency electronics], Moscow, Sov. Radio, 400 p.
- [15] Murin B. P. ed. (1978) *Lineinye uskoriteli ionov* [Linear ion accelerators], Moscow, Atomizdat, 320 p.
- [16] Semenov A. A. (1968) *Teoriya elektromagnitnykh voln* [The theory of electromagnetic waves], Moscow, Izd-vo Mosk. Un-ta, 319 p.
- [17] Schantz H. G. (2001) Electromagnetic Energy Around Hertzian Dipoles, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 43, No 2, pp. 50-62. DOI: 10.1109/74.924604

Распределение энергии в электромагнитном поле. Порции потока энергии. Порции энергии

Найденко В. И.

Проанализировано распределение энергии в электромагнитном поле гармонической волны. Введено понятие порции потока энергии, порции энергии. Доказано, что энергия электромагнитной волны распространяется порциями (квантами, в не самом современном понимании этого слова). Показано, что фазовая скорость физически понятной величине - это скорость распространения порций потока энергии, порций энергии. Процесс переноса энергии является волновым процессом, движущегося со скоростью, равной фазовой скорости компонент поля, вектора Пойнтинга, плотности энергии и энергии.

Ключевые слова: гармоничная волна; фазовая скорость; волновой процесс, вектор Пойнтинга; плотность энергии; энергия в объеме

Power distribution in the electromagnetic field. Portions of energy flows. portions energy

Naidenko V. I.

New concepts of the phase velocity of the energy flux density, the phase velocity of the energy density, the concept of a portion of the energy flux density, portions of the energy density are introduced. The entered values shed light on the energy distribution of the electromagnetic field of a harmonic wave in space, the nature of an electromagnetic wave, the process of energy transfer by an electromagnetic wave. The energy of an electromagnetic wave is propagated in portions (quanta, in a non-modern sense of the word). It is shown that the phase velocity is a physically understandable quantity - the speed of propagation of portions of the energy flow, energy portions. The process of energy transfer is a wave process moving with a velocity equal to the phase velocity of the field components, the Poynting vector, the energy and energy density. The flow of the Poynting vector does not arise from zero. One serving leaves (shifts in the direction of spreading), another one comes into its place. The continuity of the energy flow should be interpreted as the continuity of the flow of portions of energy, the continuity of the flow of mean value. The reduced results, simple from the mathematical and physical points of view, become more complicated when considering more complicated processes, for example, waves excited by a Hertz dipole.

Key words: phase velocity of the energy flux density; phase velocity of the energy density; the concept of a portion of the energy flux density; portions of the energy density